

Magnézium: a fém, mely nagyon könnyű, de fontosnak találtatott

A szerzők felelevenítik a magnézium históriáját, és áttekintik az elsődleges fém gyártására szolgáló elektrolízises és pirometallurgiai eljárásokat. Ismertetik a magnézium világpiacán az elmúlt 20 évben lezajlott, rendkívül jelentős átalakulásokat, amelyek során az USA mint fő felhasználó termelése teljesen visszaesett, és Kína hegemon szerepbe került. Számos érdekes példán keresztül ismerheti meg az olvasó a magnézium és ötvözeinek jelenlegi alkalmazásait. Ezen a téren az alumíniumötvözetek gyártását mint vezető felhasználási területet egészen szorosan követi az „önálló” alkalmazások sora, a nyomásos öntéssel készülő járműipari, számítástechnikai stb. termékek egyre bővülő köre.

1. A magnézium tulajdonságai

A 12-es rendszámú magnézium, ez az ezüstfehér színű lágy fém a közelmúlt és a jelenkor egyik legnagyobb karriert befutott anyaga. Sikerét annak köszönheti, hogy az ipari fémek között ő a legkönnyebb. Jobb oldali szomszédjánál, az alumíniumnál is jóval kisebb a sűrűsége, mindössze $1,738 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Kristályszerkezete legsűrűbb hexagonális (HCP), a rácshálódai: $a=0,3209 \text{ nm}$, $c=0,521 \text{ nm}$.

A forráspontja 1090°C , az olvadáspontja $648,8^\circ\text{C}$, amely hőmérsékleten már kisvákuumban is szublimál. Ez a jellegzetessége jól hasznosítható a tiszta fém gyártására irányuló kohászati folyamatokban, de a Mg és ötvözeinek vákuumos olvasztását lehetetlenné teszi.

Hőtágulási együtthatója $29,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, amely tehát az alumíniuménál is nagyobb, vagyis jelentős zsugorodásokkal kell számolni az öntészeti alkalmazásokban. $155 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ értékű hővezetési tényezője és $4,46 \cdot 10^{-3} \Omega\cdot\text{cm}$ -es fajlagos ellenállása

nem sokkal marad el az alumíniumétól.

Kémiai tulajdonságait tekintve, a tiszta magnézium oxidációja szobahőmérsékleten lassú. Oxidja, az MgO nagyon stabil, száraz atmoszférában 450°C -ig jól védő felületi réteget alkot. A nedvesség jelenléte azonban nagyon elönytelenül befolyásolja a korróziós viselkedést. Levegőn való égése csak az olvadáspont (egyes esetekben pedig 310°C) felett lehetséges, viszont ott nagyon heves. A nitrogén kedvezőtlen hatású magnézium-nitridet (Mg_3N_2) formál, ezért az öntészeti alkalmazásokban ezt a gázt is ki kell zárni az olvadási környezetéből.

A magnézium 70°C felett elkezd bontani a vizet. A savak mindegyike megtámadja, kivéve a krómsavat és az egyébként igen agresszív folyosavat, amely összefüggő Mg_3F védőréteget képez a fémfelületen. A szerves vegyületeknek általában ellenáll, de pl. a metanol, a glicerin és a glikol korrodálja.

A fémmagnézium mechanikai tulajdonságai a színfémek között közepesnek ne-

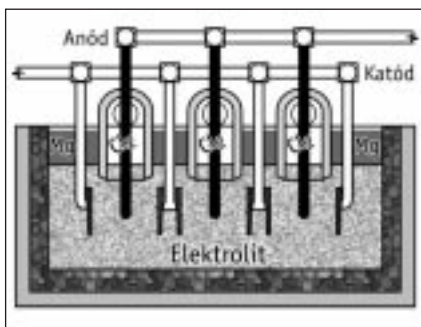
vezhetők: Young-modulusa 47 GPa , folyáshatára kb. 50 MPa , szakítószilárdsága 200 MPa , nyúlása 10% . Természetesen az ötvözők jelentősen befolyásolják ezeket a jellemzőket.

E könnyűfém históriájában az első fontos állomás a magnézium felfedezése, amely *Humphrey Davy* (1778-1829.) angol kémikus nevéhez fűződik 1808-ban. Azonban az előzmények is meghatározónak mondhatók – legalábbis az elnevezésre nézve bizonyosan. 1700 táján fedeztek fel egy gyógyító hatású ásványt, amelyről azt hitték, hogy a már az ókor óta ismert mágnes (magnetit) párjával (magnesia, vagyis mangán-dioxid) áll rokonságban, ezért magnesia alba névre keresztelték. Valójában ez hidratált magnézium-karbonát volt, és lúgossága miatt összetévesztették a mésszel. *Felix Hoffmann* mutatta ki 1740-ben, hogy a magnesia és a mész két különböző anyag, és *Joseph Black* (1775.) ismerte fel, hogy itt egy új elemről van szó. Az oxidok olvadáskánál elektrolízisével *Davy* meg is találta a Ca, a Sr és a Ba mellett a magnéziumot, de ez utóbbi csak 1812-ben kapta a mai nevét, addig volt némi zűrzavar az elnevezések terén. Kézzel fogható mennyiségű fémként csak 1831-ben sikerült előállítani (*Antoine Alexandre Brutus Bussy*) a földkéreg nyolcadik leggyakoribb elemét.

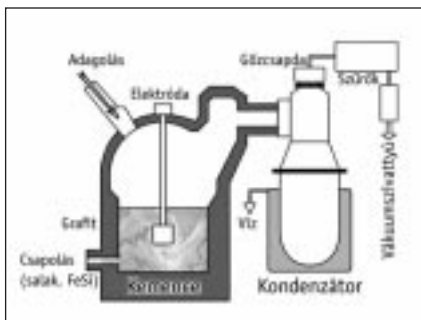
Ipari előállításának első módszerét *Henry Sainte-Claire Deville* és *Henry Caron* dolgozta ki (1857.), majd *Johnson* és *Matthey* (1864). A franciák egy véletlen folytán észrevették a magnézium pirotechnikai alkalmazásának lehetőségét. Az 1862-ben megrendezett londoni világkiállítás óta az attrakciók közé tartozik. 1896-ban kezdett termelni az első valódi nagyüzem – a Chemische Fabrik Elektron A.G. Bitterfeldben – amely magnézium-klorid elektrolízisével állította elő a fémet. 1909 áprilisában nyújtotta be a Chemische Fabrik Griesheim-Elektron az első magnéziumötvözet, az „Elektronmetall” szabadalmát.

Dobránszky János a BME-n szerzett gépészmérnöki oklevelet 1986-ban. 1987-től az MTA-BME Fémtechnológiai Kutatócsoportban (BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, ATT) dolgozik mint kutatómérnök. Lapunk Vaskohászat rovatának szerkesztője. **Bernáth Andrea** V. éves egyetemi hallgató a BME Gépészmérnöki Karán. Tanulmányai mellett részt vesz a BME ATT kutatási tevékenységében. Hegesztés témakörben végzett TDK-munkájával sikeresen szerepelt a 2005. évi OTDT-n.

Orbulov Imre V. éves egyetemi hallgató a BME Gépészmérnöki Karán. Tanulmányai mellett részt vesz a BME ATT kutatási tevékenységében. Az alumíniummátrixú kompozitok gyártása és az öntöttvascsövek károsodása témakörben végzett TDK-munkájával sikeresen szerepelt a 2005. évi OTDT-n.



■ 1. ábra. Az I.G. Farben elektrolizáló kádjának vázlata



■ 2. ábra. A Magnetherm-eljárás vázlata

2. A magnézium előállítása

Az elsődleges magnézium előállítására jelenleg a következő eljárásokat alkalmazzák:

- a magnézium-klorid sóolvadékos elektrolízise,
- a Pidgeon-féle pirometallurgiai eljárás,
- a fém-salak reakciókon alapuló (szintén pirometallurgiai) Magnetherm-eljárás.

20 évvel ezelőtt a kapacitások 70%-a az elektrolízisre épült, amely eljárásnak 20 ezer tonna/év az optimális kapacitása. Az elektrolízis energiaigénye igen nagy, 9500-12000 kWh/tonna, és a folyamat jelentős szerepet játszik a Ti és a Zr előállításának gazdaságosságában is. A Magnetherm-eljárás adta a termelés 20%-át, mintegy 7000 tonna/éves kemencénkénti kapacitással. Ennek az eljárásnak kisebb, kb. 8500 kWh/t az energiaigénye. A Pidgeon-eljárás fő vonzereje a viszonylagos egyszerűség, az üzemeltetés rugalmassága és a jóval kisebb beruházási költségek. Kemencénként átlagosan 5000 tonna fém termelhető évente.

A magnézium számos ércben megtalálható; a legolcsóbb és legerjedtebb a $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ dolomit és az MgCO_3 magnézit. A pirometallurgiai eljárásokban használt $\text{MgO} \cdot \text{CaO}$ -t és a MgO magnéziát („készföld”) kb. 1000°C-os kalcináló forgókemencékben állítják elő. A KCl-el képzett

kloridos ércet, a karnallitot is használják, és nagy készletek állnak rendelkezésre az igen nagy Mg-tartalmú brucitból és bischofitból Oroszországban és Ukrajnában. Ugyancsak fontos magnéziumforrás a tengervíz, amely 1,3 g/liter Mg-t tartalmaz klorid formában. A vízből hidroxidként kicsapatható, ez pedig magnéziává kalcinálható. A MgO nagyon stabil oxid, ezért az egyszerű redukciós eljárások nem járhatók.

2.1. A magnézium előállítása elektrolízissel

Tekintve, hogy a Mg elektródpotenciálja nagyon negatív (-2,03 V), gyakorlatilag csak elektrolízissel állítható elő valamilyik sójának olvadékból. Gazdaságossági szempontból a kloridja és a szulfátja jöhet szóba, de ez utóbbi a fémgyártásra alkalmatlan amiatt, hogy reakcióba lép a fémrel, miközben MgO és kén-dioxid keletkezik. A kloridelektrolizáló eljárás első lépése a tiszta, ill. többé-kevésbé vízmentes MgCl_2 előállítása, a második pedig az olvasztott MgCl_2 elektrolízise.

Amennyiben a tengervíz az „érc”, az elektrolízist a MgCl_2 előállítása előzi meg, amely technológiában a következő lépések követik egymást:

- az $\text{Mg}(\text{OH})_2$ hidroxid kicsapátása $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mészkővel,
- a víz kiűzése kalcinálással, az MgO kinyerésére,
- karboklóros kezelés:



Ez az exoterm reakció függőleges kemencében zajlik le kb. 800°C-on, és vízmentes Mg-klorid olvadékot eredményez.

Az elektrolízis során a Mg^{2+} ionok a katódon válnak ki fémolvadékként, az anódon pedig klórgáz fejlődik. Az elektrolizáló kád hőmérséklete mintegy 740°C, de természetesen többfajta eljárást és cellatípust dolgoztak ki a különböző országokban, amelyek pl. nem csak teljesen vízmentes kloriddal dolgoznak. Talán a legjellemzőbb az I.G. Farben eljárás. Ebben az elektrolizáló cellát folyamatosan táplálják az elektrolit-tal, amelynek ösz-

szetétéle: 40% CaCl_2 , 30% NaCl , 20% KCl és 10% MgCl_2 . A többi fém kloridjának bomlási feszültsége nagyobb, mint a Mg-kloridé, amely 2,6-2,8 V. Azért tartják ilyen kis értéken a MgCl_2 koncentrációját, mert a Mg oldhatósága a kloridjában relatíve nagy, s ez csökkenti a gyártás teljesítményét. További problémát jelent a Mg kis gőznyomása (740°C-on 10 torr) és az oxigénhez való nagy affinitása.

Az alumínium elektrolízisétől eltérően az elektródok függőlegesek. Az 1950-es évek elején kidolgozott alaptéchnológia tiszta vas katódot és amorf szén vagy grafit anódot alkalmaz, amelyeket hőálló diafragmák választanak el. A könnyű Mg-olvadék az elektrolit tetején úszik. Egy hagyományos elektrolizáló cella elrendezési vázlata látható az 1. ábrán. A Faraday-törvény szerint elméletileg 2200 Ah villamos áram szükséges 1 kg Mg előállításához. A kádak 5 V feszültség és 150 kA áram mellett 0,45 A/m² áramsűrűséggel dolgoznak, a katódaram hatásfoka 80-90%. Az energiafelhasználást jelentősen csökkentették az elmúlt évtizedek fejlesztéseivel, pl. diafragmentes cellákkal (DLE) és a multipoláris cellákkal 18 kWh/t értékről csaknem a felére, 9500 kWh/t-ra. Meg kell azonban azt is jegyezni, hogy az Mg-gyártás a fő kibocsátóforrása a súlyosan mérgező dioxinnak.

2.2. Pirometallurgiai módszerek

A MgO Ellingham-egyenese a forráspont alatti tartományban jóval lejjebb helyezkedik el a képződési szabadentalpiákat a hőmérséklet függvényében ábrázoló diagramokon, mint a fő redukálószerké (C, Si, Al), ami azt jelenti, hogy ezen elemekkel

1. táblázat. A Mg-termelés technológiai és termelési adatai 10 és 20 évvel ezelőtt, [ezer tonna]

Ország	Alapanyag	Eljárás	1986.	1996.
Franciaország	Dolomit	M	12	15
Olaszország	Dolomit	B	15	12
Norvégia	Dolomit, tengervíz	E	60	51
Jugoszlávia	Dolomit	E	5	5
USA	Tengervíz, dolomit, sóstóvíz	E	60	51
		M	36	36
		E	34	36
Kanada	Magnézia, dolomit	E	-	60
		P	10	12
Összesen			290	345
E = elektrolízis, B = Bolzano-eljárás, M = Magnatherm-eljárás, P = Pidgeon-eljárás				

2. táblázat. Az elsődleges Mg-termelés adatai, 1999-2003. [tonna]

	1999.	2000.	2001.	2002.	2003.
Franciaország	16200	16500	4800	2000	-
Norvégia	40800	41400	40700	3100	-
Oroszország	35200	35500	35000	35000	30000
Szerbia	1203	1270	203	-	500
Kanada	64000	64000	65000	70000	50000
USA	75000	94000	50000	20000	10000
Brazília	7968	5723	5500	4500	4000
Kína	120700	142100	199700	231700	354000
Izrael	24300	31700	34000	28000	28000
Kazahsztán	11031	10380	16455	17858	14164
Összesen	396402	442573	451358	412158	490664

való redukciója nem lehetséges. Ámde az 1107°C-os forrpont felett a MgO Ellingham-egyenese erősen felfelé hajlik, és metszi az említett redukálószerke egyeneseit, mégpedig annál kisebb hőmérsékleten, minél kisebb a nyomás. Ennek következtében lehetségessé válik a redukció a Mg gőz fázisának hőmérséklettartományában.

A szénnel való, erősen endoterm redukció termodinamikailag 1800°C felett lehetséges normál nyomáson ($p_{\text{Mg}} = p_{\text{CO}} = 105 \text{ Pa}$), és a 400°C-ra való reakcióképességhez 1864 Pa-os ($p_{\text{Mg}} = 932 \text{ Pa}$) depresszió szükséges. A magnézium reoxidációját feltétlenül el kell kerülni a gőz lecsapata és a megszilárdulás közben.

A szilíciummal való redukció termodinamikailag 1600°C felett lehetséges, ha a nyomás viszonylag kicsi ($p = 2100 \text{ Pa}$), és a további hőmérséklet-csökkentéshez jelentős nyomáscsökkentés szükséges.

A Pidgeon-eljárás

A Lloyd Montgomery Pidgeon által kidolgozott és 1942 januárjában sikeresen kipróbált eljárás (amely Kínában ma a domináns technológia) előkezelt MgOCaO dolomitot használ, redukálószerként pedig 75-85% Si-tartalmú ferroszilíciumot. A kalcinált, aprított, ferroszilíciummal kevert és agglomerált, majd 1200°C-ra előmelegített anyagot külső fűtésű, horizontális vákuumkonverterben redukálják, a fém gőzt pedig az egyik végéhez illeszkedő kondenzátor fogja meg. A folyamat hőmérséklete 1200°C, a nyomás pedig 100 Pa. A fő reakció a következő:



A kanadai Timminco és a japán Ube vállalatok alkalmazzák a Pidgeon-eljárást, és Kína is erre az eljárásra alapozva vált szinte hihetetlen tempóban a világ fő termelőjévé. Egy retortában naponta 70 kg

ta az eljárást, amelynek 7,0-7,3 MWh/t az energiaigénye, és 2 tonna a kemencék napi termelése.

A Magnetherm-eljárás

Hasonlóan a Pidgeon-eljáráshoz, az alapanyagok ebben az esetben is dolomit és ferroszilícium, a hőmérséklet és a nyomás viszont lényegesen nagyobb: 1550-1650°C, ill. 5-10 kPa. A redukció fém-salak reakciók keretében zajlik le. Az olvadt salakban oldódott MgO-t a ferroszilíciumban oldott Si a következő reakció szerint redukálja:



A francia Péchiney által 1963-ban kidolgozott technológia vázlatát a 2. ábra mutatja. A kemence falazat grafitból készül, amelynek boltozatán keresztül egy vízzel hűtött Cu-elektrod lóg be az elektrolitba. Az erősen endoterm folyamathoz a hőt a salak villamos ellenállásán fejlődő hővel szállítják. Az anyagbeadagolás egy ideig folyamatosan zajlik. A megolvadó ferroszilícium fokozatosan feloldja a magnézium-oxidot. A reakció miatt a FeSi Si-ban egyre szegényedik, leülepedik a kemence fenékre, ahol felhalmozódik. Az alapanyagok beadagolását akkor állítják le, amikor a salakréteg eléri egy bizonyos vastagságot (kb. 150 cm). Lecsapolják a maradék FeSi-t és a salak egy részét, hogy kb. 30 cm maradjon, majd kezdik előlről a ciklust.

A redukció folyamatosan zajlik a reaktorban, a beadagolás után egy

99,95-99,98%-os tisztaságú fémot állítanak elő.

A Pidgeon-eljárástól abban különbözik a Bolzano-módszer, hogy ez utóbbinál belső fűtésű vákuumkemencét alkalmaznak. Az olasz Società Italiana per il Leghe di Magnesio (SAIM) és a brazil Brasmag alkalmaz-

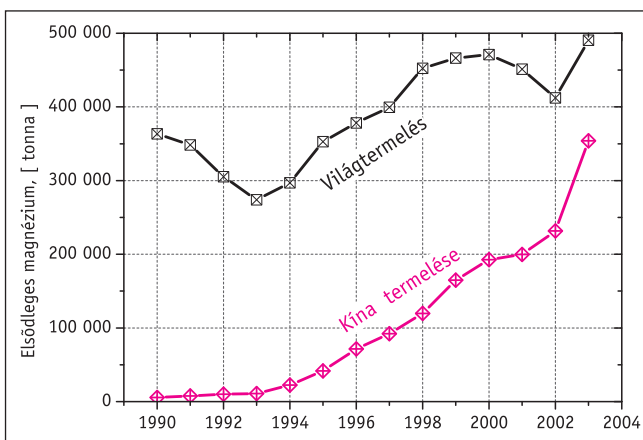
bizonyos időt vesz igénybe. A salak – amely ezen a hőmérsékleten nem teljesen olvadék fázisú – összetétele messze nem konstans: 57-60% CaO, 25% SiO₂, 11-14% Al₂O₃, 4-6% MgO. A szilárd fázisú salak mintegy 40%, az olvadék pedig telített MgO-ban. A redukációs folyamat lezajlását számos érdekes részfolyamat befolyásolja, amelyek közül csak megemlítenénk néhányat: a gravitáció, a magnéziumbuborékok képződési zónája, a salakfürdő mozgása, a felületi feszültség, az ülepedési sebesség.

3. A magnézium világpiaca

A gyártási módszerek áttekintése után érdemes megvizsgálni, hogy a világ néhány nagy Mg-gyártója milyen technológiát alkalmaz, és miként alakult a termelésük volumene (1. táblázat). Az 1996-os adatok alig mutatnak eltérést a 10 évvel korábbiaktól, ezt követően viszont rendkívüli átalakulások zajlottak le a magnéziumtermelésben.

Az USA-ban töredékére zuhant az elsődleges magnézium termelése (eközben a világ legnagyobb újrafeldolgozója lett, pl. 1999-ben 87300 tonnát olvasztott újra), Kína viszont szinte a nulláról indulva egyeduralgódott lett: a világtermelésnek már több mint a felét adja (2. táblázat és 3. ábra). A kereslet erőteljes növekedése miatt új gyártókapacitások épültek/épülnek Kínában, Ausztráliában, Kanadában, Izlandon és Kongóban.

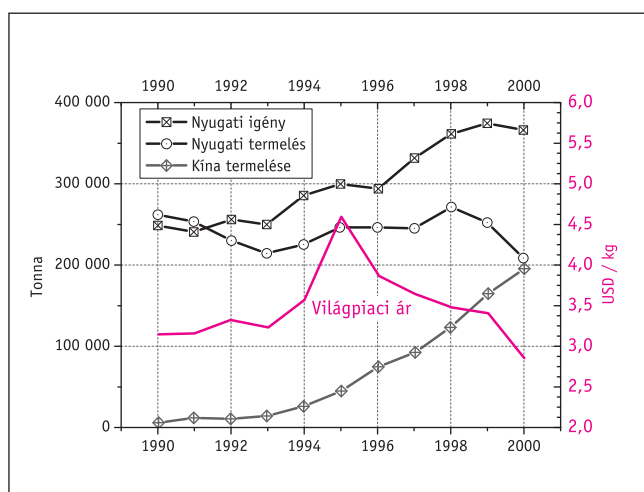
A magnézium ára az elmúlt években folyamatosan 2000 USD/tonna körül mozgott, amint azt a 4. ábra mutatja. A diagramon feltüntetett árak az alumíniumtövezetek gyártására, ill. az acélipari alkalmazásra kerülő termékekre vonatkoznak.



3. ábra. Kína és a világ magnéziumtermelésének alakulása az utóbbi 15 évben



4. ábra. A magnézium árának változása a közelmúltban



5. ábra. A magnézium árának változása a közelmúltban

A fokozott minőségű („high grade”) termékekre, amelyeket öntészeti célra használnak elsősorban, 25-50% felárat kell fizetni.

A korábbi évek árait vizsgálva, 10 évvel ezelőtti 4000 USD/t-s csúcson jegyezték az EU-s piacon a magnéziumot. A kínai termelés felfutása a növekvő nyugati kereslet mellett is jelentős árcsökkenésre vezetett.

Az 5. ábra adataiból jól látható ez a trend, amelyet nyilvánvalóan az magyar, hogy a 2000-ben is mindössze 26 ezer tonnás kínai belföldi magnéziumfelhasználáson felül olcsón megtermelt hatalmas mennyiségű fémet a kínai termelésnél lassabban bővülő piacon kellett értékesíteni.

4. A magyar külkereskedelem jellemzői

Magyarország magnéziumigénye – ahogyan azt a 6. ábra jól érzékelteti – 1998-ig stabilan az egy-másfél ezer tonna éves szinten mozgott, amelyet orosz és ukrán forrásból elégített ki. 1999-ben jelentős váltás figyelhető meg a statisztikai adatokban:

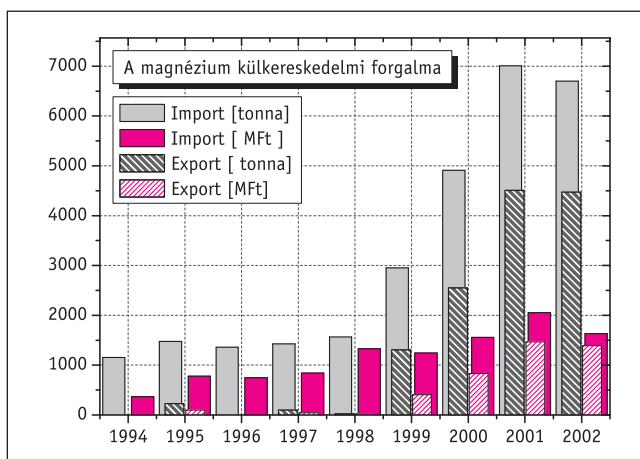
- Erőteljesen emelkedett a behozatal is és a kivitel is
- Totálisan átrendeződött a fő beszállító és célországok hierarchiája. A behozatalban Kína, majd Ausztria vált dominánssá, a külpiaci vevők között pedig monarchiabeli társunk szinte egyeduralkodó lett. A részletes adatokat a 3. táblázat tartalmazza.

5. A magnézium felhasználása

A megtermelt mennyiség felhasználása terén a következőképpen alakult a fogyasztói szektorok megoszlása 2002-ben: 40%-ot tett ki az alumíniumötvözetek gyártása, 35%-os részesedést ért el a nyomásos öntés (amely 10 év alatt egyébként a duplájára növekedett), 16% jut az acélgyártásra (kéntelenítés) és 9% az egyéb területeknek (pl. segédanyagok korrózióvédelem, öntöttvasgyártás, Ti-, Zr-gyártás stb.). A felhasználásban a Föld régióit tekintve az USA és Kanada használja fel az össz fogyasztás 49%-át, Európa a harmadát, Ázsia és Óceánia pedig 14%-ot. A továbbiakban – a teljesség igénye nélkül –

3. táblázat. Magyarország magnézium-külkereskedelmének adatai

Év	Import Tonna	MFt	1. ország	Tonna	MFt	2. ország	Tonna	MFt	3. ország	Tonna	MFt	1+2+3 Tonna	1+2+3 MFt
1995.	1 474	776	Oroszország	993	485	Ukrajna	357	149	Olaszország	13	72	1 363	706
1996.	1 359	749	Oroszország	926	472	Ukrajna	358	149	Olaszország	16	87	1 300	708
1997.	1 428	843	Oroszország	586	298	Ukrajna	616	275	Olaszország	14	137	1 216	710
1998.	1 564	1 327	Kína	657	350	Olaszország	38	330	Oroszország	502	301	1 197	981
1999.	2 954	1 245	Kína	1 006	481	Ausztria	1 633	379	Olaszország	16	190	2 655	1 050
2000.	4 910	1 557	Kína	1 957	894	Ausztria	2 912	601	Olaszország	1	37	4 870	1 532
2001.	7 007	2 055	Ausztria	5 183	1 196	Kína	1 796	766	Hollandia	1	29	6 980	1 991
2002.	6 700	1 632	Ausztria	3 745	763	Kína	1 646	619	Szlovénia	1276	225	6 667	1 607
Export													
1995.	227	100	Hollandia	80	36	Lengyelország	40	18	Ausztria	38	16	158	70
1996.	nincs	adat											
1997.	99	45	Szlovákia	99	43	Ausztria	0	2	Jugoszlávia	0	0	99	45
1998.	21	23	SzírIA	8	12	Ausztria	1	8	Oroszország	9	2	18	22
1999.	1 307	409	Ausztria	1 263	395	Németország	43	14	Jugoszlávia	0	0	1 306	409
2000.	2 549	832	Ausztria	2 548	828	Belgium	0	1	SzírIA	0	1	2 548	830
2001.	4 510	1 468	Ausztria	4 485	1 461	Szlovákia	23	3	Belgium	0	2	4 508	1 466
2002.	4 473	1 391	Ausztria	4 300	1 340	Szlovénia	100	28	Lengyelország	54	13	4 454	1 381



■ **6. ábra.** A magnézium hazai külkereskedelmi adatai (forrás: Kopint-Datorg)

4. táblázat. Magnéziumpiaci modelladatok 2015-re

Modell	Kapacitás kt/év	Minimális ár [USD/kg]	Mg / autó [kg]
1.	850	1,56	7,7 (EU)10 (USA)
2.	960	1,52	8,1 (EU)12,2 (USA)
3.	1540	1,41	16,8 (EU)25,9 (USA)
4.	3000	1,25	~34 (EU)~68 (USA)

bemutatunk néhányat a fontosabb és érdekesebb alkalmazási területek közül.

Autóipari alkalmazások

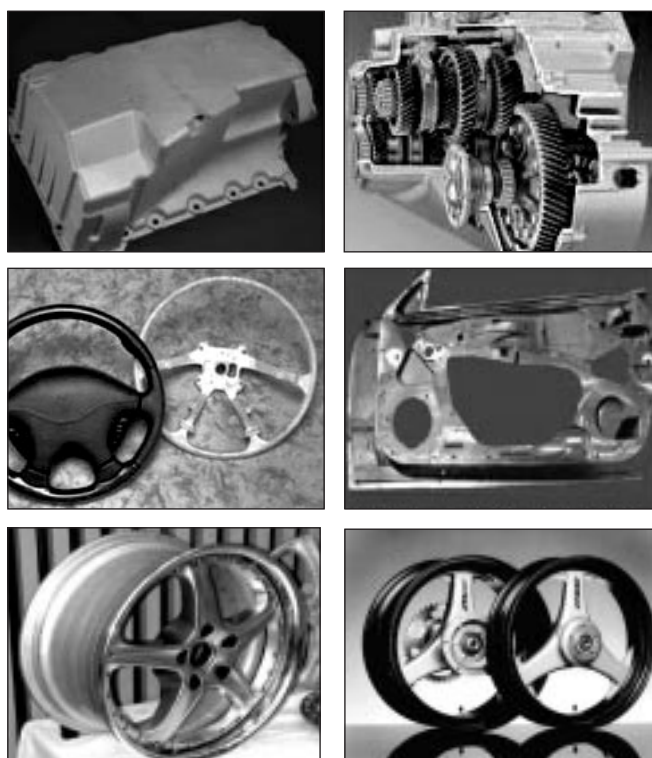
Különösen intenzíven növekedik tehát az öntészeti felhasználás, amely a járműgyártás és az informatikai ipar radikális változásaival függ össze. Nagy előnyt jelent a kiváló önthetőség, hiszen öntéssel nagyon vékony falvastagságok is elérhetők. A magnézium szinte végleges alakra önthető, így nem igényel különösebb utómegmunkálást sem. A termelékenység növekszik, a termék előállítási költsége pe-

dig csökken. Az autóiparban már az 1930-as évek közepén kezdték jelentősebb mennyiségben használni a magnéziumötvözeteket: *Ferdinand Porsche* 1934-ben kb. 25 kg magnéziumötvényt tervezett a Volkswagen (*7.a ábra*) kardántengelyházba és a léghűtéses motorokba (a Mercedes történetírói pedig 1900-ra teszik az első, magnéziumból készült motoralkatrészt). Az „egyliteres” tanulmányautóját a Volkswagen 2001-ben gyártotta: tömege 260 kg, amelyből 35 kg magnéziumötvözet, ill. Mg-alapú kompozit. Az üléstartókeret és a teljes vázszerkezet magnéziumból ké-

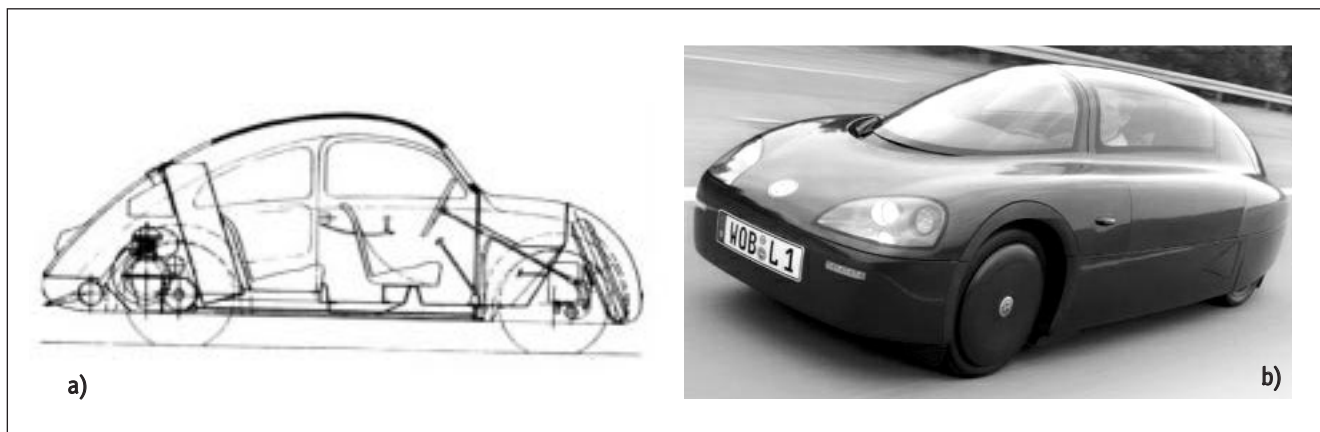
szült (*7.b. ábra*). További autóalkatrészeket mutat a *8. és a 9. ábra*.

Jelenleg a magnézium átlagos mennyisége egy járműben kb. 2 kg, de a nagy gyártók tanulmányai szerint több, mint 100 kg alkatrész potenciálisan kiváltható magnéziummal.

A magnézium is egyike azoknak a szerkezeti anyagoknak, amelyek jövője nagy mértékben összefügg az autóipar jövőbeni változásaival. Urbance és szerzőtársai 3 éve egy átfogó tanulmányt tettek közzé a JOM-ban, amely a lehetséges piaci forgatókönyveket modellezi a 2015-re várható



■ **8. ábra.** Mg-öntvény olajteknő, a VW Golf hajtóműháza, 3 kg tömegű Mercedes ajtókeret, kormánykerék, keréktárcsák



■ **7. ábra.** Ferdinand Porsche népautója (1934.), a VW 1 liter/100 km fogyasztású tanulmányautója 2001-ből



■ 10. ábra. A 10 tonna Mg-t tartalmazó Convair B-36 repülőgép

■ 9. ábra. Mg-öntvényből készült autóalkatrész (Meridian Technologies)

ipari folyamatok beszámításával. Négy forgatókönyvet írnak le a termelőkapacitások, a világpiaci ár és a személyautókba beépített átlagos mennyiségek közötti várható kapcsolatra, amelyeket a 4. táblázat foglal össze. Ugyanakkor meg kell említeni, hogy a túl nagy mennyiségű magnéziumnak lehetnek kedvezőtlen hatásai is: a Firehaus.com internetes portál 2004 december közepén arról számolt be, hogy egy kigyulladt Cherokee Jeepet a tűzoltók vízzel akartak eloltani, de az eredmény hatalmas tűzijáték lett, mivel az égő magnézium a vízzel hevesen reagált.

Repülőgépgyártás, űrkutatás

A második világháború alatt előtérbe került a magnéziumötvözetek alkalmazása a repü-

lőgépgyártásban. Óriási mennyiségű repülőgépet gyártottak a harcoló felek, s ezekben nagy szerepet kaptak a Mg-ötvözetek, amelyek a gépek önsúlyát voltak hivatottak csökkenteni. Magnéziumból készítették mintegy 70 ezer repülőgép egyes hajtóműalkatrészeit és kerekeit. A 10. ábrán látható amerikai Convair B-36 „Peacemaker” típusú bombázóba darabonként mintegy 10 tonna (!) Mg-t építettek be.

A második világháború után a magnéziumgyártó ipar hanyatlásnak indult, amelyhez az is hozzájárult, hogy az 1950- és években megjelent a titán, amely ugyan háromszor nehezebb a magnéziumnál, de szilárdsága és korróziós jellemzői a gázturbinás repülőgépek és az űrtechnikai eszközök építésében jó néhány területen „esélyt sem adtak” a magnéziumnak.

Ennek ellenére számos, főleg katonai légijárművet fejlesztettek ki, elsősorban az USA-ban. 1950-ben jelent meg a Westland Aircraft S55 típusú helikoptere, amelynek külső lemezburkolata 115 kg ZW3 típusú Mg-ötvözetet tartalmazott. Az F80C vadászipar repülőgép gyakorlatilag teljesen magnéziumötvözetből készült. Napjaink két óriásvállalata, a Boeing és az Airbus

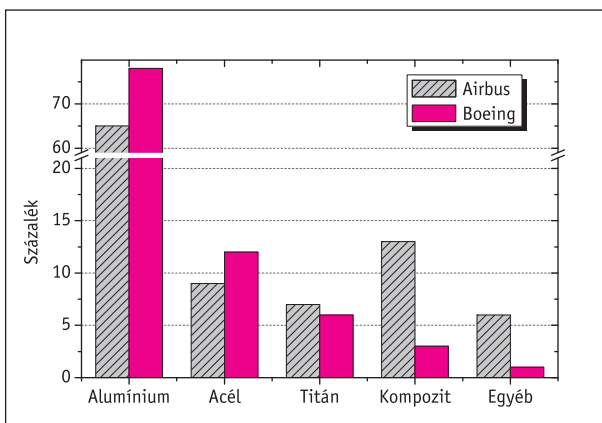
anyagfelhasználására a 11. ábra adatai jellemzők: a magnézium az egyéb kategóriába csúszik, de pl. az A380-as szuperlégibuszba ??? kg Mg-t építettek be. Fontos megemlíteni, hogy a Mg-ötvözetek repülőgépipari alkalmazásának kutatását-fejlesztését megcélzó IDEA-projektet (Integrated Design and Product Development for the Eco-efficient Production of Lowweight Airplane Equipment) az EU 6. keretprogramja támogatja, és az erre alakult konzorciumnak a magyar Fémalk is tagja.

A repülőgépgyártás terén elsősorban a katonai célú alkalmazások a jellemzők, de a magnéziumnak több más katonai felhasználása is jellemző, pl. a páncéltörő gránátok, rakétaeltérítők, világítógránátok gyártása.

Az űrtechnikai eszközök esetében mindezt elkövetnek a fellovési tömeg csökkentésére. Mg-ötvözetből (AZ31, azaz Mg-3%Al-1%Zn), ill. Mg-mátrixú kompozitból kis tartóelemeket (pl. a tükrök és a zérus hőtágulású mérőberendezések számára, 12. ábra) készítenek. E téren igen hasznos, hogy a kompozitok erősítőanyagaként használt szénszálat viszonylag jól nedvesíti a Mg-olvadék (ami nem mondható el az alumíniumra). Érdekes módon a Mg/C-kompozitok sűrűsége nagyobb, mint a fémmagnéziumé.

Az Mg/C-kompozit anyagú szerkezetek esetén nulla lehet az axiális irányú hőtágulás és mintegy 2 ppm/K a transzverzális irányú. Emellett ezen anyag fajlagos merevség másfélszerese a berilliuménak, és 9,5-szöröse a Invar-ötvözetének. E különleges hőtágulási tulajdonság nagyon fontos, hiszen az űreszközök több száz fokok hőingadozásnak vannak kitéve a napsugárzás miatt.

A szerzők hálás köszönetüket fejezik ki Németh Árpádnak (KOPINT-DATORG) a hazai vámt statisztikai adatokért.



■ 11. ábra. Az Airbus és a Boeing anyagainak megoszlása



■ 12. ábra. Tükörtartó